西北地区气候暖湿化空间与季节差异分析

张红丽[1]， 韩富强[2]， 张 良[3]， 王莉霞[1]， 孙 源[4]， 李富民[1]

（1. 天水师范学院资源与环境工程学院，甘肃 天水 741000；2. 新疆师范大学地理科学与旅游学院，新疆乌鲁木齐 830054；3. 中国气象局兰州干旱气象研究所，甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室，中国气象局干旱气候变化与减灾重点实验室，甘肃 兰州 730020；4. 国家气候中心，北京 100081）

摘 要：对我国西北地区气候暖湿化趋势的进一步探讨，有助于深入理解北半球中高纬干旱半干旱区对全球气候变暖的响应这一重要科学问题。利用西北地区1961—2021年127个台站的气温和降水量资料，结合线性趋势、Kriging插值、非参数Mann-Kendall检验等统计学方法，通过分析表明：(1) 近60 a西北地区整体呈显著暖湿化趋势。区域升温趋势较为一致，为0.32 ℃·(10a)$^{-1}$，增湿的区域不平衡特征明显，西北西部增湿较东部更早、更稳定和显著，西部主要分布在新疆西北部，而东部增湿主要分布在青海地区；(2) 增温与增湿的年代际波动不平衡性突出，西北的气温和降水分别于1993年和2010年发生了突变现象，突变后的增温增湿气候倾向率分别较突变前高0.08 ℃·(10a)$^{-1}$和37.60 mm·(10a)$^{-1}$，突变后暖湿化更为突出，并且以暖湿化东扩为主要特点；(3) 暖湿化的季节不平衡性分析还表明，西北全域60 a以来，以冬季增暖最为显著，春季次之，但突变发生后东部和西部均调整为春季变暖最为显著；西北西部的冬季降水增加显著，西北东部春季与夏季降水增加明显。研究结果可为制定西北地区气候变化应对措施提供理论依据。

关键词：西北地区；暖湿化；气温；降水量

气候变化不仅影响人类生存环境，也将影响世界经济和社会进步。目前全球正处在气候变暖的背景下，IPCC第六次报告指出，相比于1850—1990年，2001—2020年全球平均地表温度增加了0.99 ℃(0.84~1.10 ℃)，2011—2020年增加了1.09 ℃(0.95~1.2 ℃)，并且陆地增温程度(1.59 ℃)明显大于海洋(0.88 ℃)[1]，这种以全球变暖为主要特征的气候变化带来的多地极端高温气候事件，例如森林火灾，并且这种灾害风险会随着气候变暖持续增加[2]。同样，伴随着增暖而出现的局地降水的增加趋势也会导致湖水决堤等多种灾害[3]，因此对气候变化的研究已经受到诸多学者的关注[4-7]。西北地区因长期气候干燥、多年平均降水量少(甚至小于150 mm)、降水变率大、气候干旱、生态环境脆弱的气候背景，使得人类生活环境及自然植被等对气候变化的响应十分敏感[8-9]，因而关于气候变化特征研究对该区域生态文明建设、生态资源的利用等方面提供了一定的理论依据。

全球变暖背景下，1961—2020年中国地表平均气温上升速率[0.26 ℃·(10a)$^{-1}$]明显高于同期全球平均水平[0.15 ℃·(10a)$^{-1}$]，而西北地区近60 a气温增温速率更显著[0.34 ℃·(10a)$^{-1}$][10]。在显著的升温背景下，2002年施雅风等[11-12]提出西北地区尤其新疆以天山西部为主的区域气候出现了由暖干转向暖湿的强劲信号，转折时间出现在20世纪80年代左右[13-15]，同时西北地区极端气候事件也更加突出[16]。这一观点在多数研究中得到了验证[17-19]，发现西北地区年平均气温、极端低温、极端高温气候倾向率分别为0.42 ℃·(10a)$^{-1}$、0.58 ℃·(10a)$^{-1}$、0.39 ℃·(10a)$^{-1}$，尤其以1997年以来的升温加速，同时降水量倾向率为4.87 mm·(10a)$^{-1}$，以河西走廊东部地区增加最为显著[20]，并且在大气可降水量、河流径流量、湖泊水位、植被覆盖等方面均有体现[3]。后期基于观测资料对空间差异性分析的最新研究发现，西北地区东

收稿日期：2022-02-02； **修订日期：**2022-12-09
基金项目：国家自然科学基金(41875020)；甘肃省自然科学青年基金(20JR10RA446)；省青年科技基金(20JR10RA804)
作者简介：张红丽(1990-)，女，副教授，博士，从事干旱气象与干旱气候方面研究. E-mail: zhanghl13@lzu.edu.cn
通讯作者：张良. E-mail: lzhangmet@hootmail.com

部和西部在干湿变化趋势上存在"跷跷板"现象,西部呈现"变湿"趋势而东部呈现"变干"趋势[21-22],并且这种变湿趋势在21世纪开始东扩,西北东部也呈现出"暖湿化"趋势[23-24]。尽管通过模式模拟结果显示,西北增温增湿现象在未来将持续存在[25],但针对历史时期气候的研究表明,21世纪初新疆地区开始出现暖湿趋势减缓现象[26],过去的暖湿化并未改变西北地区干旱半干旱的气候背景格局[27-28]。季节气候变化对整体暖湿化的贡献同样受到关注,研究发现1961—2011年中国西部气候由暖干向暖湿转型主要是夏秋季降水量的贡献[18],而最新研究表明,1961—2018年间冬季降水对西北暖湿化的贡献最为显著[29],然而关于季节尺度对暖湿现象的贡献研究结果较少。

综上所述,诸多研究表明北半球中高纬干旱半干旱区对全球气候变暖的响应相比于其他气候区更为强烈,区域不平衡问题凸显,这加强了对西北地区暖湿化的科学认识。然而,目前对于该区域的暖湿化问题,还缺乏对已显示出的区域不平衡问题最直观和最新的定量描述,而这一问题不仅体现在气候中重点关注的年代际问题中,还表现在对季节尺度的关注。为了解决这一问题,本文收集整理了西北地区127个站点1961—2017年的气温和降水量资料,通过分析暖湿化的区域不平衡和多尺度时间特征,并重点关注季节尺度对暖湿化的调整和变化,为西北暖湿气候变化成因等研究提供理论依据,以期更深入的认识西北地区的气候变化规律与机制。

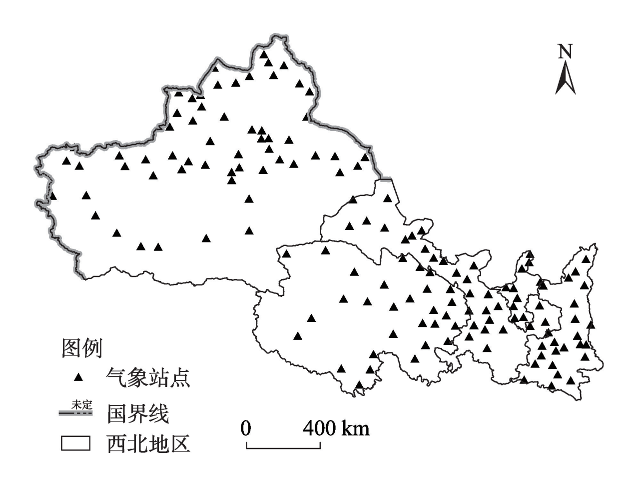
1 研究区概况与资料方法

1.1 研究区概况

西北地区包括新疆、青海、甘肃、宁夏和陕西。该区域的地形以高原、盆地和山地为主,新疆境内山脉和盆地相间,东部以黄土高原、河套平原、宁夏平原为主。西北地区深居内陆,远离海洋,高原、山地地形较高阻挡了湿润气流的输送,导致本区降水稀少,气候干旱,且降水自东向西递减。西北地区下垫面类型的空间分布差异大,从西到东下垫面可分为戈壁荒漠、荒漠草原、戈壁沙漠、黄土高原。由于西北地区经度范围广,气候变化空间差异大,为使得研究更为客观合理,参照缪启龙[30]的划分方法,将中国西北地区分为西北西部和西北东部两个区域,西北西部地区包含新疆,西北东部地区包含陕西、甘肃、宁夏、青海,下文将西北西部地区和东部地区简称西部和东部。

1.2 观测资料

所用数据来源于国家气象信息中心提供的西北地区127个地面台站的日气温和降水量站点资料。因我国基本、基准气象台站多数有过迁移,气温降水的观测仪器和观测规范也在20世纪60年代之前发生过变化,20世纪60年代之后的观测资料均一性更好[31],因此选取研究时段为1960—2021年,将原始资料进行质量检测,对月内逐日资料缺测2 d的月份定为缺测,将1年内缺测5个月的站点进行剔除,其余缺测数据进行时间插值,最终确定站点数为127个(图1)。根据西北地区的气候特征,将3—5月划分为春季、6—8月为夏季、9—11月为秋季、12月至次年2月为冬季。



注:底图采用自然资源部标准地图制作,审图号为GS(2020)4619,对底图边界无修改。下同。

图1 西北地区气象站点分布图

Fig. 1 Spatial distribution of the meteorological stations in Northwest China

1.3 研究方法

利用线性趋势法[32]分析气温和降水的气候倾向率;Kriging插值法[33]进行空间插值,Kriging插值是建立在预先定义的协方差模型基础上,对区域化变量的取值进行无偏、最优估计的一种方法,可以弥补线性趋势方法在气象要素空间差异分析上的不足;Mann-Kendall(M-K)检验法[32]检验时间序列变化趋势的显著性及年代际突变,其优点是不需要样本遵从一定的分布,也不受少数异常值的干扰,计算简单,适合于气温和降水变量的趋势检验,具体参照张盛霖等[34]的Mann-Kendall检验法和应用步骤。

2　年平均气温和年降水量的时空特征

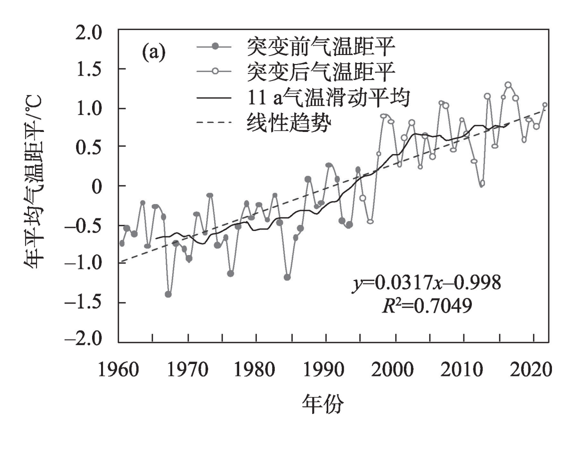
西北地区气候属于温带干燥气候，年平均气温与降水年际波动幅度较大，近60 a来的平均值为7.02 ℃，最高为8.31 ℃，最低为5.72 ℃，标准差为0.65；年平均降水量为296 mm，最多年份为375 mm，最少年份为218 mm，标准差为189.30。

由图2a可以看出，气温距平在1960—1990年呈缓慢上升趋势，1990年以后呈迅速上升趋势，60 a的整体气候倾向率为0.32 ℃·(10a)$^{-1}$(通过0.05显著性检验)。气温距平值在1960—1996年主要为负值，而1997—2017年的气温距平值全为正值，且有6 a的气温距平值在1 ℃以上，2015年气温距平值达到近60 a最高值1.26 ℃，可见近20 a来气候变暖十分显著。

图2b年降水量距平显示，近60 a呈波动性增加趋势，在1960—1985年呈微弱的波动上升趋势，1986—1996年呈下降趋势，20世纪90年代末期以后降水量一直呈显著上升趋势，整体气候倾向率为6.69 mm·(10a)$^{-1}$，2000—2021年的气候倾向率达到24.05 mm·(10a)$^{-1}$，均通过了0.05显著性水平，可见近年来西北地区的年降水量迅速增多。

进一步利用MK突变检验气温和降水的年代际突变特征，结果显示，西北年平均气温在1995年发生了突变(图3a)，突变后气候倾向率0.24 ℃·(10a)$^{-1}$比突变前气候倾向率0.16 ℃·(10a)$^{-1}$更加显著(均通过了0.05显著性检验)。突变后气温明显升高的事实与Zhang等[4]的研究结果相一致；年降水量在2010年左右发生了突变，降水突变后超过了1.96显著性水平线，突变后气候倾向率39.84 mm·(10a)$^{-1}$比突变前气候倾向率2.24 mm·(10a)$^{-1}$更加明显。

因西北纬度跨度大使得气温及降水在其西部和东部存在较大差异，西部和东部的年平均气温分别为7.67 ℃、6.60 ℃，最高气温分别为8.99 ℃、7.92 ℃，最低气温分别为6.19 ℃、5.32 ℃，年平均气



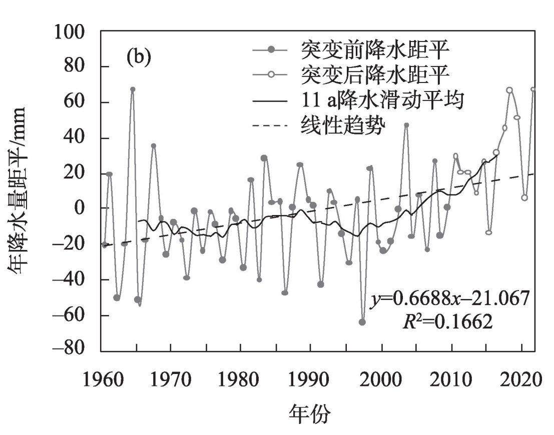


图2　1960—2021年西北地区年平均气温距平(a)、年降水量距平变化(b)

Fig. 2　Variation of annual average temperature (a) and annual precipitation (b) anomaly change in Northwest China during 1960–2021

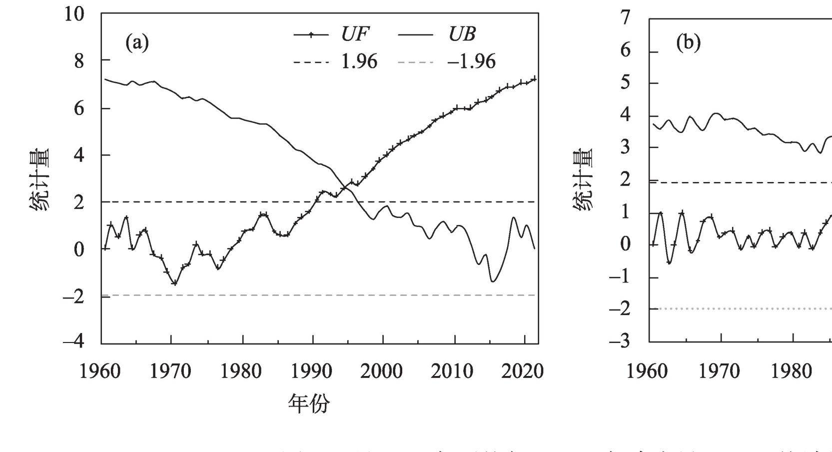


图3　西北地区年平均气温(a)和年降水量(b)M-K统计量

Fig. 3　Curve of annual average temperature (a) and precipitation (b) M-K statistics in the Northwest China

温标准差分别为0.65、0.72；年平均降水量分别为142.39 mm、396.37 mm，最大降水量分别为215.47 mm、532.55 mm，最小降水量分别为99.84 mm、295.95 mm，年降水量的标准差分别为26.82、45.50。总体上，东部较西部更冷更湿，并且气温和降水的年际波动更加剧烈。

图4显示了西部和东部地区气温和降水量距平时间演变，可以看到西部的气温（图4a）和降水（图4b）距平整体呈现平稳的上升趋势，均从20世纪80年代初之后大多为正，近60 a气候倾向率分别为0.32 ℃·(10a)$^{-1}$、7.78 mm·(10a)$^{-1}$，均通过了0.05显著性检验；而东部的气温和降水距平的气候倾向率分别为0.32 ℃·(10a)$^{-1}$（通过了0.05显著性检验）、6.01 mm·(10a)$^{-1}$。可见，西部和东部近60 a以近似的速率变暖，但是西部变湿趋势较东部更加稳定和显著。

进一步分析年代际变化特征，11 a滑动曲线结果显示，西部地区气温年代际变化不明显，降水在20世纪70年代末之前微弱减少，之后持续上升；东部气温变化较西部波动稍大，80年代初之前气温平稳，随后持续上升，但降水较西部差别较大，80年代中期之前未出现波动，随后缓慢下降，至1997年后至今迅速上升，这与张强等[23]研究发现，西北东部1997年开始转为暖湿的结果一致。对比可见，1997年以后，西北西部降水未出现增加趋势，而东部地区降水持续增加的趋势与整个西北地区降水年代际波动特征类似，因此东部地区降水增加是导致整个西北地区1997年之后降水增加的主要原因。

进一步借助M-K检验分析突变特征及突变前后气候变率差异，图5a与图5c表明西部与东部气温年代际波动类似，西部和东部分别于20世纪70年代中期、80年代中期开始气温均呈现稳定的上升趋势，之后分别于1994年、1996年发生突变，其中西部突变后上升趋势均为0.21 ℃·(10a)$^{-1}$，东部气温发生突变后的上升趋势0.20 ℃·(10a)$^{-1}$相较于突变前0.14 ℃·(10a)$^{-1}$略有增加。整体来看，西部较东部变暖更加稳定，并且较东部持续变暖开始的时间早10 a，突变时间基本一致。

西部降水量距平的M-K检验结果显示（图5b），1980年之前年际波动较大，之后呈现显著的持续上升趋势，并且在1987年左右发生了突变，突变后降

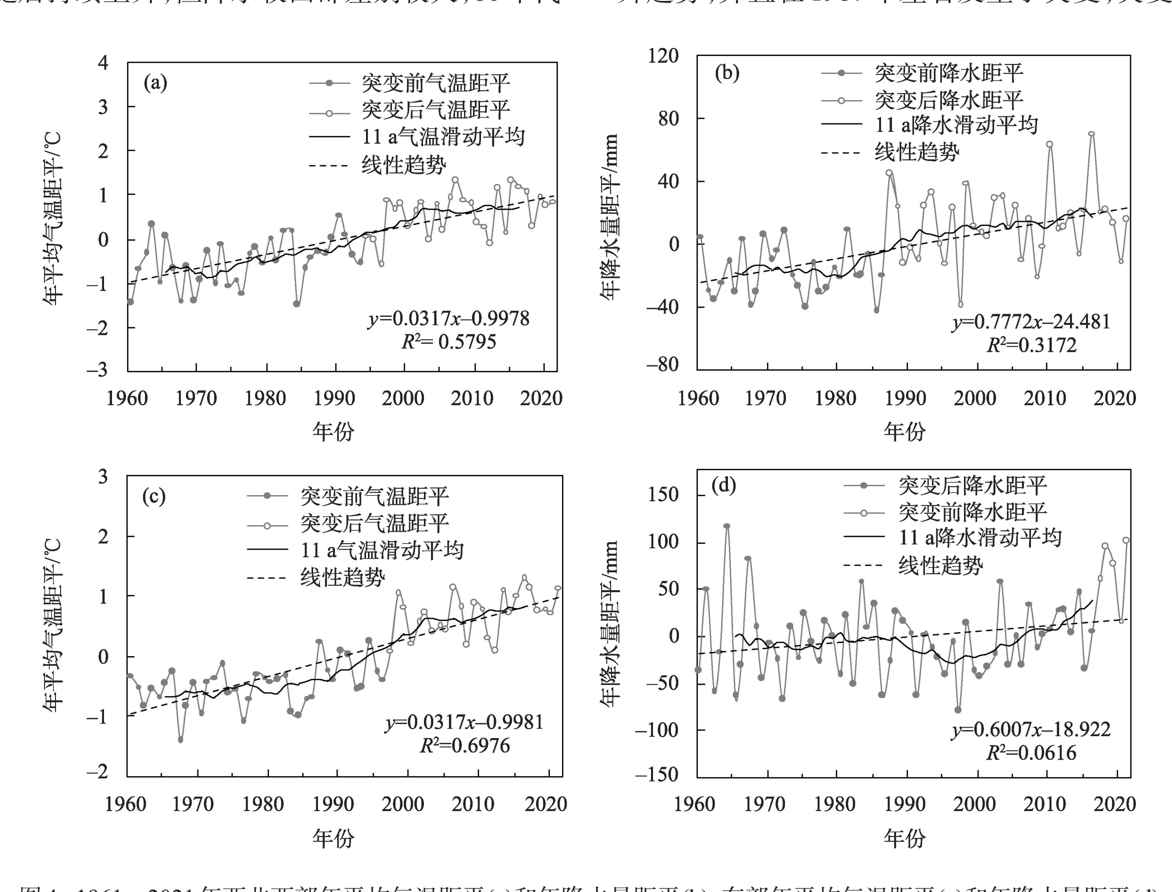


图4 1961—2021年西北西部年平均气温距平(a)和年降水量距平(b)、东部年平均气温距平(c)和年降水量距平(d)

Fig. 4 Variation of anomaly variation of annual mean temperature (a, c) and annual precipitation (b, d) in the western and eastern parts of Northwest China during 1960–2021

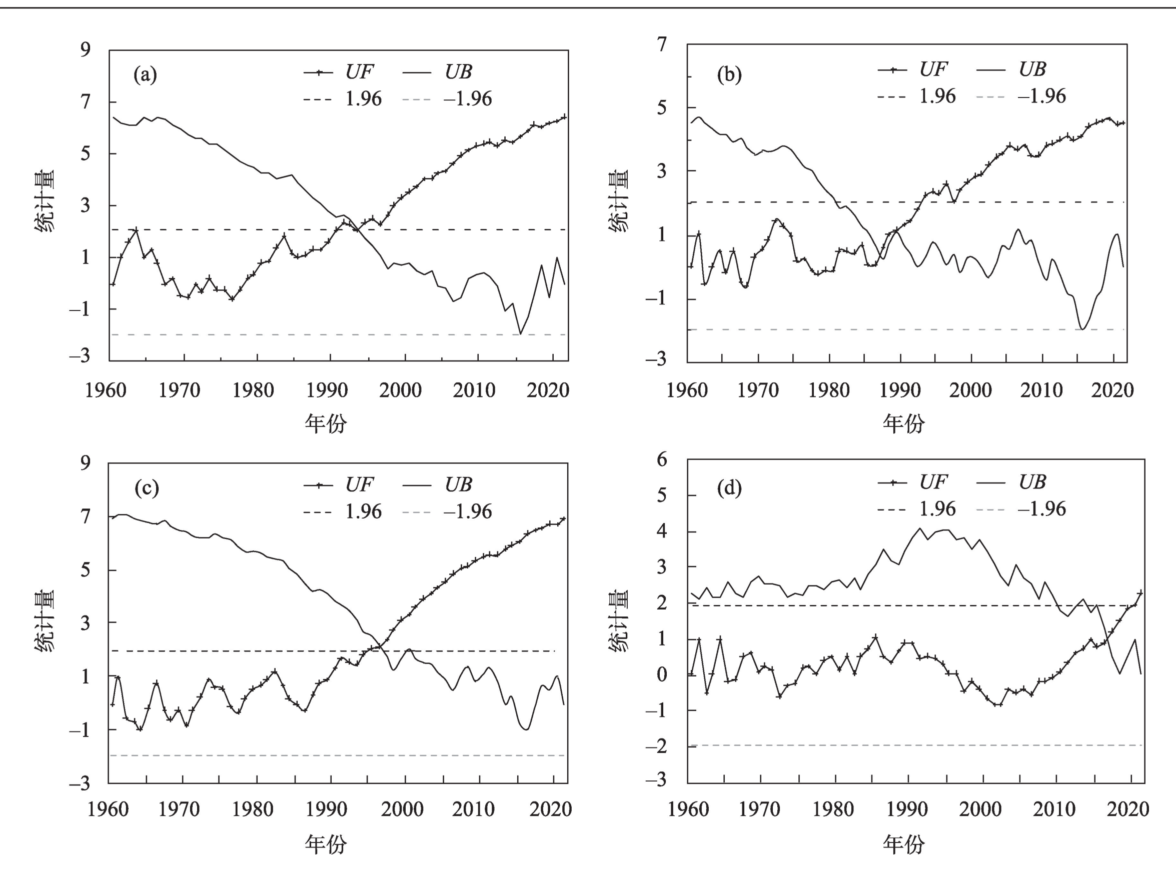


图5　西北西部年平均气温(a)和年降水量(b)、东部地区年平均气温(c)和年降水量(d)M-K统计量

Fig. 5　Curve of annual average temperature (a, c) and precipitation (b, d) M-K statistics in the western and eastern parts of the Northwest China

水量距平气候倾向率4.38 mm·(10a)$^{-1}$，较突变前3.88 mm·(10a)$^{-1}$更加显著。东部降水年代际波动与西部差异十分明显(图5d)，持续上升的时间出现在2002年，至2021年达到最高，突变时间为2017年，比西部地区持续变湿开始的时间晚近22 a，突变时间晚30 a左右。

总体来看，东部持续升温开始时间(20世纪80年代中期)比西部(70年代中期)晚10 a左右，突变基本一致(1995年左右)；东部降水持续增多时间(21世纪初)比西部降水持续增多时间(80年代初)晚20 a左右，突变时间(2017年)同样较西部(1987年)晚30 a左右，这一结果说明了西北西部地区显著暖湿化现象较西北东部地区更早。

1960—2021年西北地区年平均气温倾向率空间分布发现(图6a)，整个西北地区年平均气温均呈上升趋势，其中升温最显著的区域主要分布在新疆

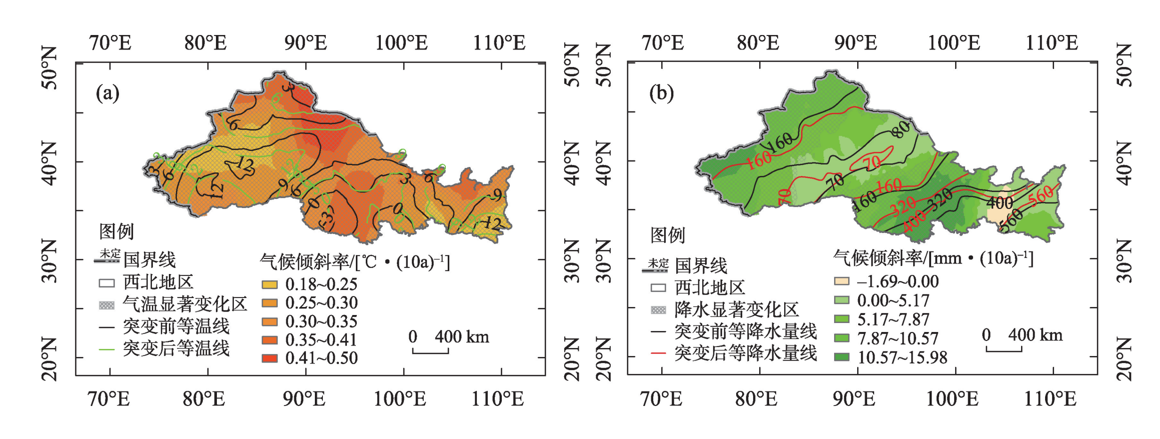


图6　西北地区年平均气温(a)、年降水量(b)变化倾向率空间分布

Fig. 6　Spatial distribution map of annual average temperature (a) and annual precipitation (b) change tendency rate in Northwest China

东北地区,其次为青海地区,升温率大于0.5 ℃·$(10a)^{-1}$的7个站点中有6个位于新疆东北地区,1个位于青海地区,其中以哈密市伊州区站升温率最大,可达0.81 ℃·$(10a)^{-1}$;新疆中西部及陕西地区升温率较其他地区小。由图6a可以看到,西部12 ℃等值线围绕的面积在1993年突变后显著增大,6 ℃等值线和9 ℃等值线突变前后位置明显北移,大于12 ℃的面积增大最为显著,说明暖中心增温速率更快。在东部地区,受青藏高原影响,青海地区为冷中心,3 ℃和6 ℃等值线南移,甘肃东部、陕西及宁夏地区9 ℃和12 ℃等值线均北移,均体现出气候变暖背景下暖中心扩大冷中心缩小的现象。

1960—2021年西北地区年降水距平倾向率空间分布(6b)表明,以青海中部降水增加最显著,其次为新疆西北部,气候倾向率大于15 mm·$(10a)^{-1}$的20个站点中有10个位于青海,7个位于新疆,其中以新疆的乌恰县气候倾向率最大,为26.79 mm·$(10a)^{-1}$,其次为青海的格尔木县,达到25.40 mm·$(10a)^{-1}$,新疆东南部、甘肃西北部呈现较弱的增加趋势;而陕西西部边界及甘肃南部地区降水量则微弱减少。同样从突变前后的等值线移动可以看出,西北西部的新疆地区存在一个干中心,从降水70 mm等值线来看,突变(1987年)之前70 mm等值线包围的面积明显大于突变之后,说明降水增多使得干中心面积明显缩减,降水较多的东部区域560 mm、400 mm、320 mm、160 mm等值线突变后也明显北移,以降水显著增加的青海地区移动最明显。总体来看,西北地区的东西部暖湿化存在差异性,西部地区暖湿化主要发生在新疆西北部;而东部地区暖湿化主要发生在青海地区。

3　气温和降水量的季节特征

3.1　气温和降水在各季节的时间演变特征

不同季节对气候暖湿化的贡献不同,进一步分析了各季节气温和降水变化特征(图7)。西北各季节气温长期趋势均表现出显著增加的现象,春夏秋冬的气候倾向率分别为0.34 ℃·$(10a)^{-1}$、0.28 ℃·$(10a)^{-1}$、0.29 ℃·$(10a)^{-1}$、0.40 ℃·$(10a)^{-1}$,均通过了0.05显著性检验,以冬季的气温气候倾向率最大;11 a滑动平均结果可见,春夏季气温年代际波动特征相似,在1960—1990年之间波动相对较小,1990年以后迅速上升,秋冬季气温年代际波动不显著;春夏秋冬的气温均发生了突变,时间分别为2002年、

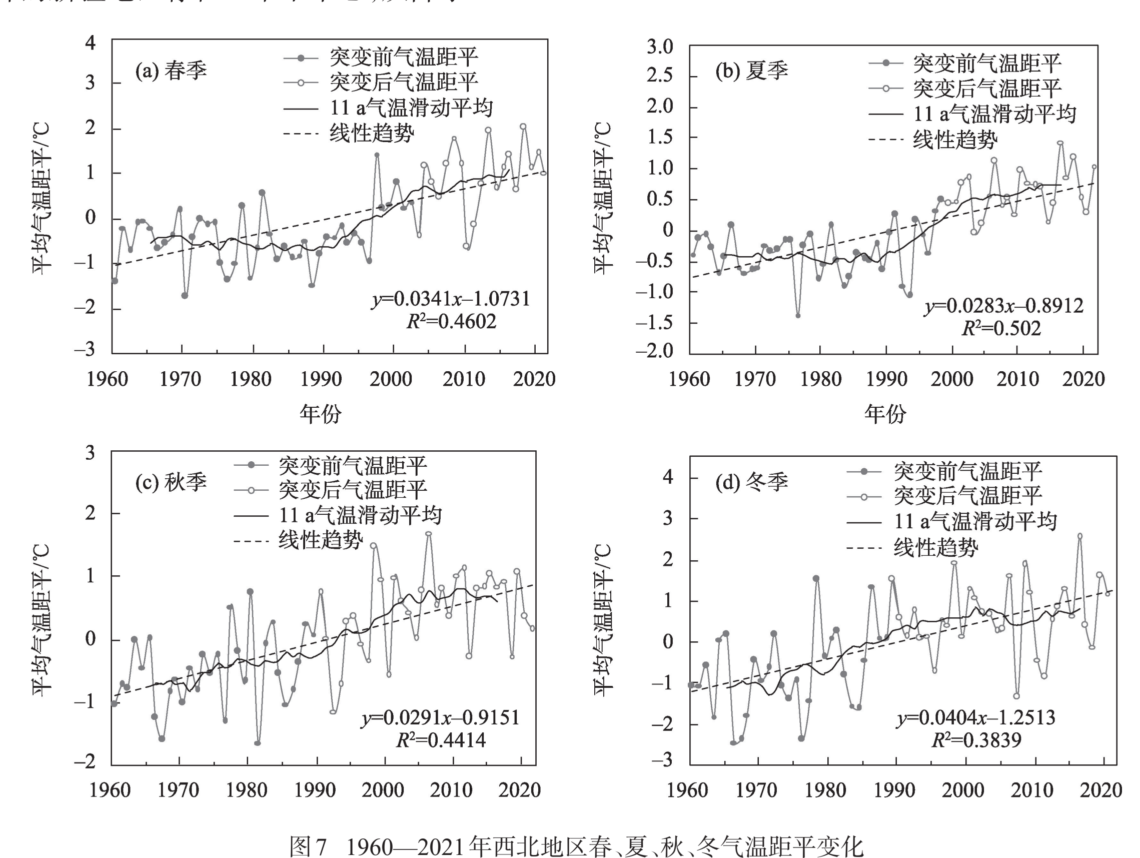


图7　1960—2021年西北地区春、夏、秋、冬气温距平变化

Fig. 7　Variation of temperature and precipitation anomalies in all seasons in Northwest China during 1960–2021

2000年、1990年、1988年，冬季发生突变最早，春季最晚。突变前后气温气候倾向率结果显示，春夏秋冬突变前分别为0.16 ℃·(10a)$^{-1}$、0.09 ℃·(10a)$^{-1}$、0.26 ℃·(10a)$^{-1}$、0.41 ℃·(10a)$^{-1}$，突变后分别为0.47 ℃·(10a)$^{-1}$、0.16 ℃·(10a)$^{-1}$、0.27 ℃·(10a)$^{-1}$、0.13 ℃·(10a)$^{-1}$。可见，近60 a各季节增温对西北地区气候变暖的贡献由大到小为：冬季、秋季、春季、夏季。而突变前后各季节对增暖的贡献不同，突变前贡献最大的季节是冬季，突变后贡献最大的季节为春季，且升温率更大。

西北地区各季节降水长期趋势同样表现出增加的现象，图8显示近60 a春夏秋冬的气候倾向率分别为1.56 mm·(10a)$^{-1}$、3.48 mm·(10a)$^{-1}$、0.77 mm·(10a)$^{-1}$、1.05 mm·(10a)$^{-1}$，仅夏季通过了0.05显著性检验，以夏季的气温气候倾向率最大；11 a滑动平均结果可见，秋冬季降水年代际波动幅度较大，春夏季降水年代际波动幅度较弱；春夏冬各季节降水年代际突变时间分别为2015年、1989年、1975年，冬季发生突变最早，其次为夏季、春季最晚。因春季突变时间距今不足一个年代(10 a)，因此突变后时段不能有效代表年代际变化的趋势特征，本文进一步计算夏季和冬季降水突变前后气候倾向率，夏冬降水突变前分别为5.21 mm·(10a)$^{-1}$、2.85 mm·(10a)$^{-1}$，突变后分别为5.15 mm·(10a)$^{-1}$、1.02 mm·(10a)$^{-1}$，可以看到突变后降水的增加趋势减弱，并且突变前后均以夏季降水增多，对整个西北地区气候变湿的贡献最大，其次为冬季。

进一步分析西北地区各季节气温和降水变化的空间差异性，从气温气候倾向率空间分布可以看到(图9)，西北地区各季节气温均呈现显著性升高趋势，均通过了0.05显著性检验(图中阴影部分)，但空间差异性明显。春季升温最显著的区域主要分布在新疆东北地区，升温率大于0.5 ℃·(10a)$^{-1}$的11个站点中7个位于新疆以北，其中以哈密市伊州区站升温率最大，可达0.86 ℃·(10a)$^{-1}$；夏季升温率不及春季显著，但最显著区域依然主要分布在新疆东部，升温率大于0.5 ℃·(10a)$^{-1}$的4个站点中有3个位于新疆，其中以伊州区站升温率最大，达到0.75 ℃·(10a)$^{-1}$；秋季升温率与夏季程度与空间分布形态类似，升温率大于0.5 ℃·(10a)$^{-1}$的6个站点中4

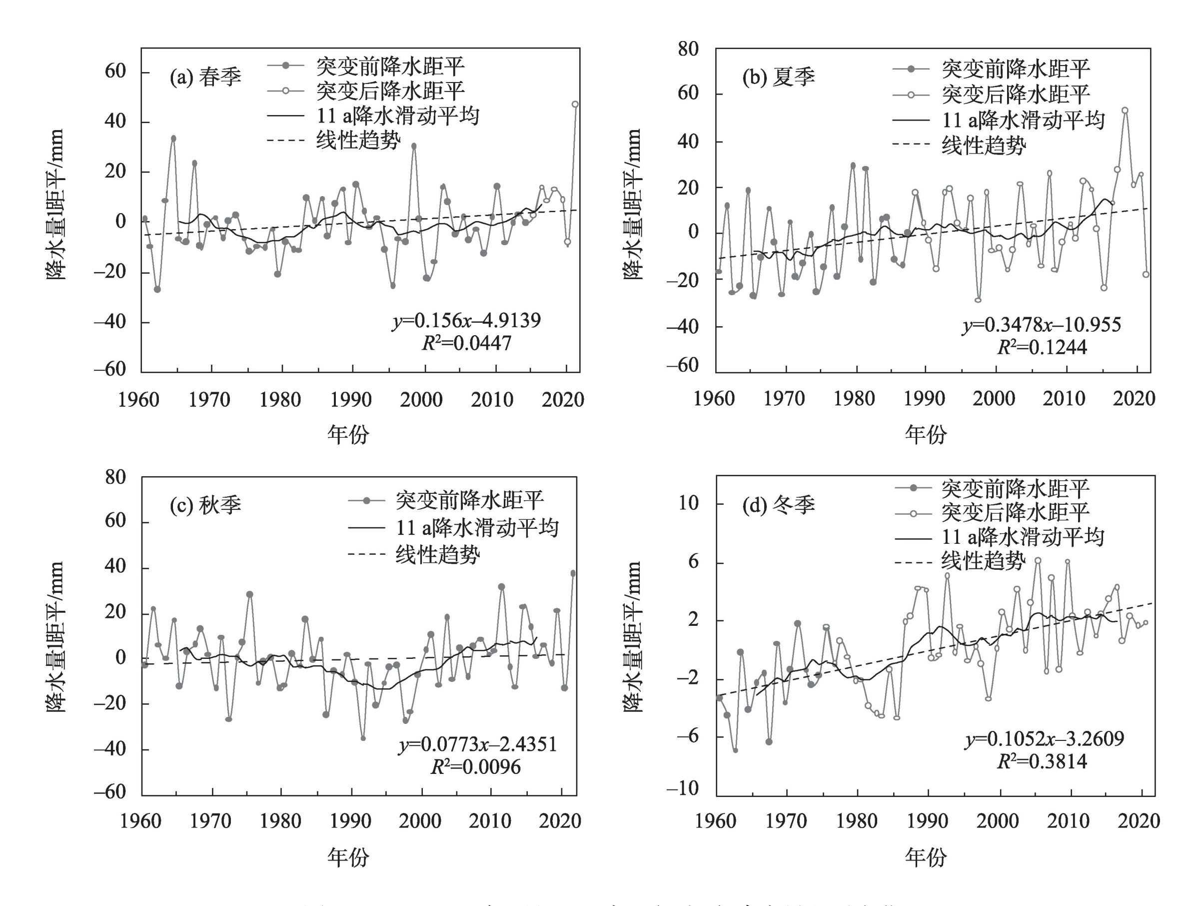


图8　1960—2021年西北地区春、夏、秋、冬降水量距平变化

Fig. 8　Variation of temperature and precipitation anomalies in all seasons in Northwest China during 1960−2021

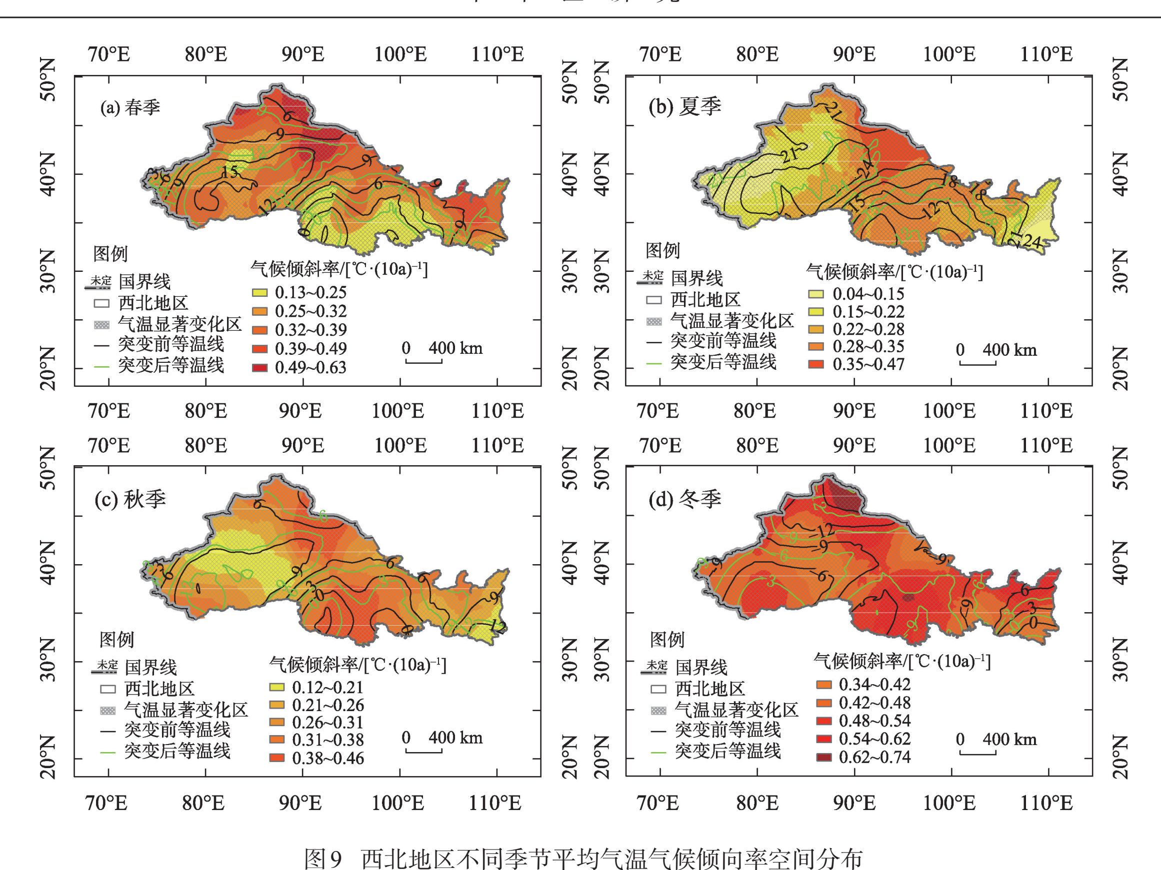


图9 西北地区不同季节平均气温气候倾向率空间分布

Fig. 9 Spatial distribution of temperature changes tendency in different seasons in Northwest China

个位于新疆,其中伊州区仍然为升温率最大的站点,达到0.89 ℃·(10a)$^{-1}$;冬季升温率较其他季节更大,显著升温区主要分布在新疆以北,其次为青海中部,升温率大于0.5 ℃·(10a)$^{-1}$的50个站点中18个位于新疆地区,16个位于青海地区,升温率大于0.80 ℃·(10a)$^{-1}$的6个站点中有3个位于新疆,其中以新疆的富蕴县升温率最大,达到1.26 ℃·(10a)$^{-1}$。以上分析可知,西北全区域的气候显著性变暖现象出现在各个区域,季节方面,以冬季升温率最显著,并且这种显著变暖主要发生在新疆东北部,其次为青海地区。

降水气候倾向率空间分布图可以看出(图10),西北地区绝大部分地区各季节降水均呈现升高趋势,但显著性增加区域相对较少(图中阴影部分),并且空间差异十分明显。春季降水增加最显著的区域主要分布在青海南部地区,气候倾向率大于5.00 mm·(10a)$^{-1}$的13个站点中11个位于青海地区,其中以青海省的达日县增加率最大,可达9.56 mm·(10a)$^{-1}$;夏季降水增加的幅度和面积均较春季大,最显著区域除青海中东部外,在新疆西部和陕西地区也出现了显著增加趋势,降水增加率大于5.00 mm·(10a)$^{-1}$的36个站点中有14个位于青海,9个位于新疆西部,8个位于陕西,降水增加率大于10.00 mm·(10a)$^{-1}$的15个站点中有6个位于青海,6个位于陕西,3个位于新疆西部,其中以陕西省的石泉县降水增加最快,达到22.21 mm·(10a)$^{-1}$;秋季降水在整个西北地区不存在显著增加区;冬季降水在新疆以北最显著,降水增加率大于5 mm·(10a)$^{-1}$的5个站点中有4个位于新疆以北,其中以新疆的伊宁市降水增加最大,增加率达到7.11 mm·(10a)$^{-1}$。以上分析可知,整个西北地区气候变湿主要由夏季、春季的青海降水增加,冬季的新疆北部降水增加而贡献。

3.2 东西部各季节气温和降水量的时间演变

除各季节长期趋势的暖湿化存在较大东西区域差异外,年代际尺度的暖湿变化也存在明显区域差异性。图11为西北西部春夏秋冬气温距平时间演变,气候倾向率分别为0.38 ℃·(10a)$^{-1}$、0.23 ℃·(10a)$^{-1}$、0.28 ℃·(10a)$^{-1}$、0.39 ℃·(10a)$^{-1}$,均通过了0.05显著性检验。11 a滑动平均结果可见,春夏季年代际波动类似,均在20世纪80年代末90年代初之前缓慢降温,之后持续增温;秋季在2005年之前增温明显,之后出现明显降温;冬季1993年之前气温增

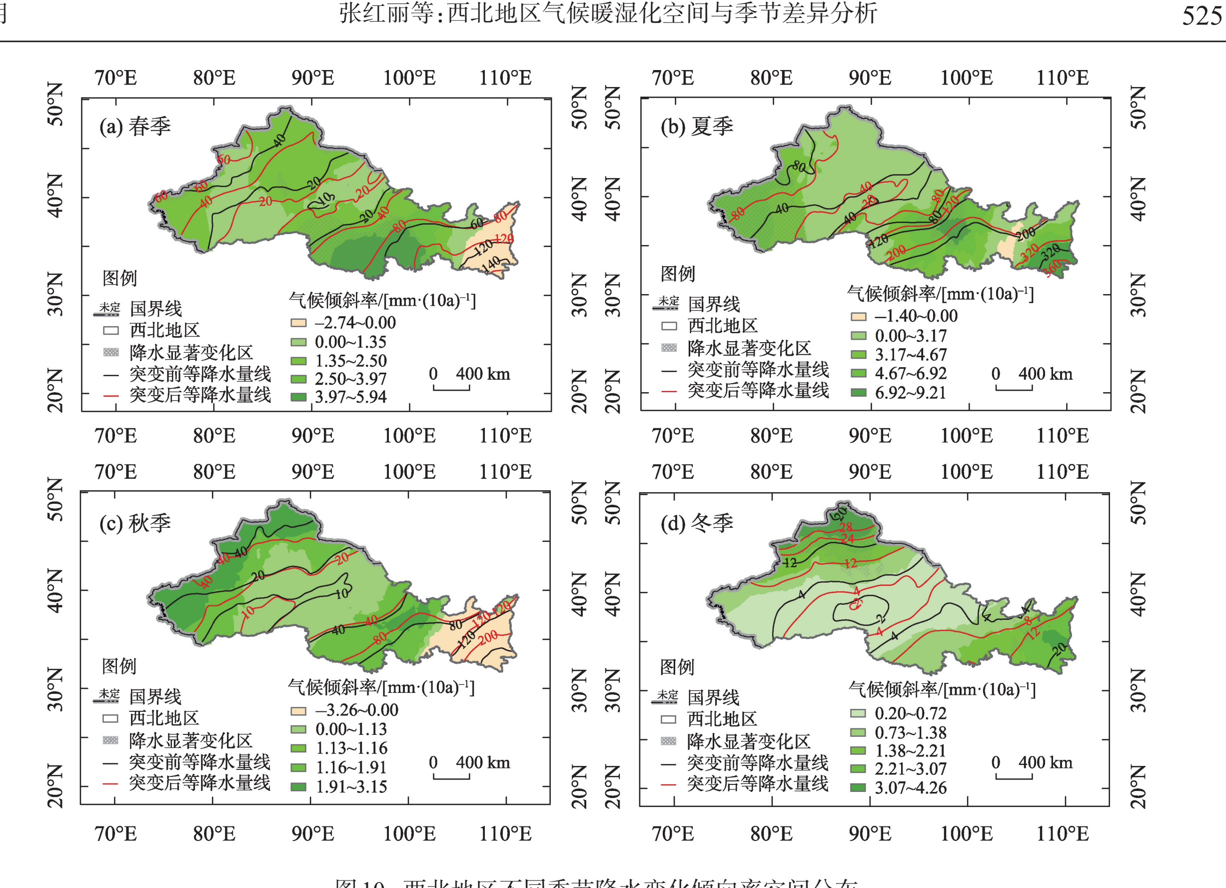


图10　西北地区不同季节降水变化倾向率空间分布

Fig. 10　Spatial distribution of precipitation changes tendency in different seasons in Northwest China

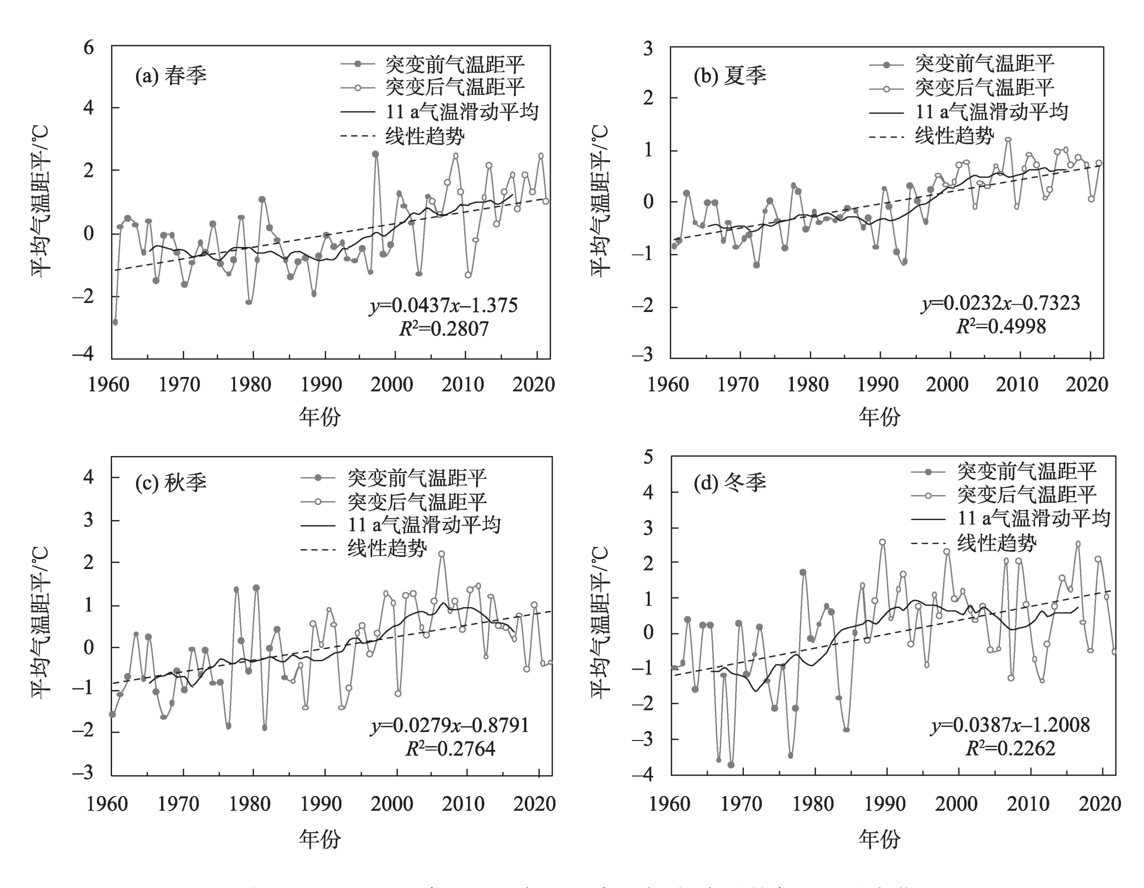


图11　1960—2021年西北西部地区春、夏、秋、冬平均气温距平变化

Fig. 11　Variation of temperature anomalies in all seasons in the west of Northwest China during 1960–2021

加显著，随后微弱下降。春夏秋冬气温突变时间分别为2005年、1998年、1985年、1985年，春季突变前后气温气候倾向率分别为0.20 ℃·(10a)$^{-1}$和0.49 ℃·(10a)$^{-1}$，夏季分别为0.10 ℃·(10a)$^{-1}$和0.11 ℃·(10a)$^{-1}$，秋季分别为0.28 ℃·(10a)$^{-1}$和0.20 ℃·(10a)$^{-1}$，冬季分别为0.16 ℃·(10a)$^{-1}$和−0.01 ℃·(10a)$^{-1}$。可见年代际尺度上，夏冬季在突变前后的升温率不明显，秋季较为明显，春季则在突变后升温十分显著。相比于气温突变前，夏季和秋季气温在突变后的增温速率更大，以春季最显著；依据年代际波动特征，可以推测近20 a升温由春季贡献，这与上述整个西北地区近些年在春季增温最显著一致。

图12为西部地区春夏秋冬降水距平的时间演变，气候倾向率分别为1.07 mm·(10a)$^{-1}$、3.21 mm·(10a)$^{-1}$、1.73 mm·(10a)$^{-1}$、1.44 mm·(10a)$^{-1}$，均通过了0.05显著性检验。11 a滑动平均结果可见，春夏冬3季年代际波动均在20世纪80年代末90年代初之前降水缓慢减少，之后呈现增加趋势，其中夏季波动性增加比春季和冬季增加更为显著；秋季年代际波动不明显。春夏秋冬降水突变时间分别为1996年、1989年、1979年、1976年，春季突变前后降水气候倾向率分别为1.43 mm·(10a)$^{-1}$和2.18 mm·(10a)$^{-1}$，夏季分别为0.55 mm·(10a)$^{-1}$和−0.70 mm·(10a)$^{-1}$，秋季分别为1.51 mm·(10a)$^{-1}$和1.41 mm·(10a)$^{-1}$，冬季分别为3.20 mm·(10a)$^{-1}$和1.48 mm·(10a)$^{-1}$。可见，西北西部整体上近60 a夏季降水增多最显著，其次为秋季、冬季和春季，夏季降水对气候变湿贡献最大的结果同整个西北地区一致；对比西部与整个西北地区降水突变后贡献，发现西北西部突变后夏季降水微弱减少，而整个西北夏季降水增多最显著，由此可知，气候发生突变后，西北西部在整个西北地区气候变湿过程中的贡献主要是春季、秋季、冬季，夏季贡献较小。此外，西北西部与整个西北地区降水年代际时间演变差别较大。

西北东部地区春夏秋冬气温距平时间演变结果可见(图13)，气候倾向率分别为0.42 ℃·(10a)$^{-1}$、0.26 ℃·(10a)$^{-1}$、0.30 ℃·(10a)$^{-1}$、0.41 ℃·(10a)$^{-1}$，均通过了0.05显著性检验，与西部地区60 a长期升温率的大小十分接近。11 a滑动平均结果可见，春夏季年代际波动类似，均在20世纪80年代末90年代初

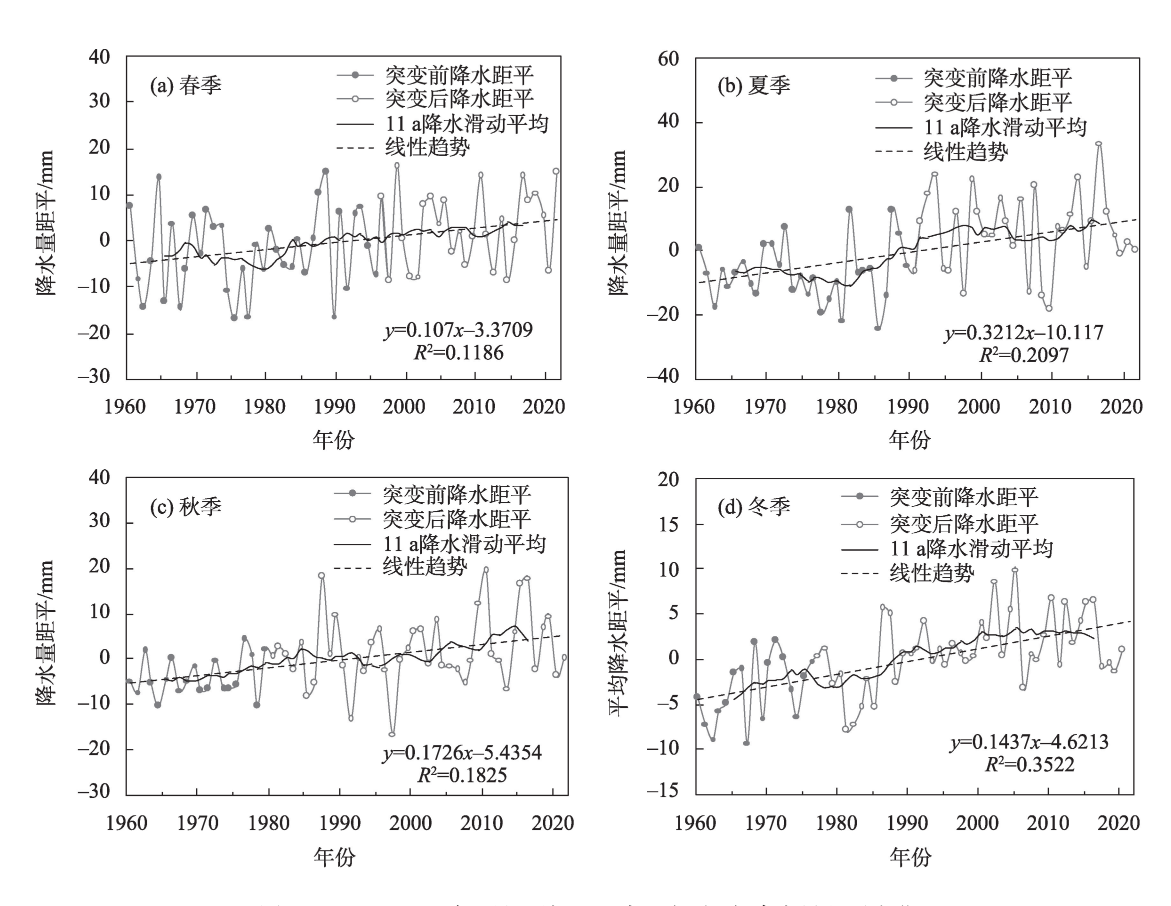


图12 1960—2021年西北西部地区春、夏、秋、冬降水量距平变化

Fig. 12 Variation of precipitation anomalies in all seasons in the west of Northwest China during 1960−2021

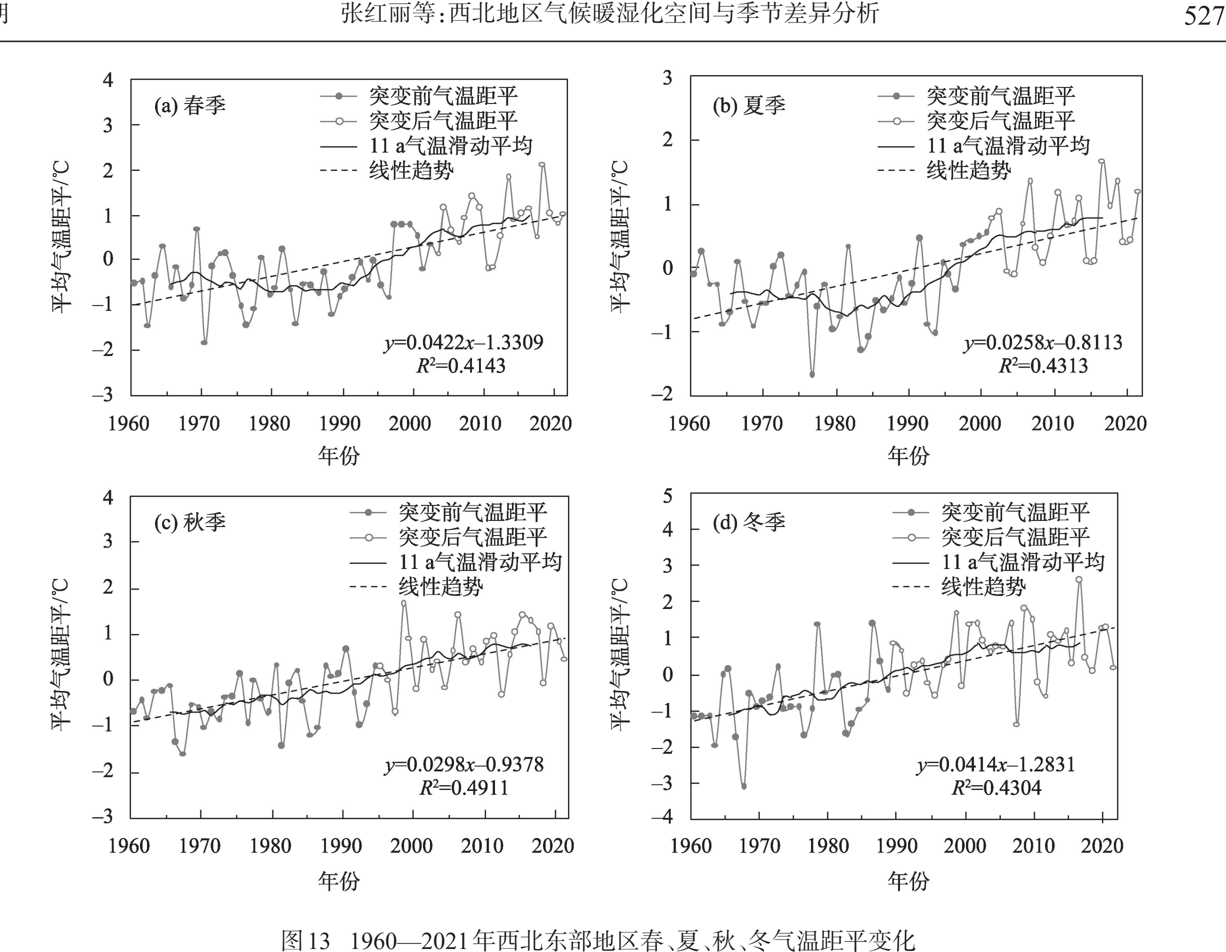


图13 1960—2021年西北东部地区春、夏、秋、冬气温距平变化

Fig. 13 Variation of temperature anomalies in all seasons in the east of Northwest China during 1960−2021

之前缓慢降温，之后迅速增温，与西部类似；秋冬季年代际变化不明显。春夏秋冬气温突变时间分别为2002年、2000年、1995年、1989年，春季突变前后气温气候倾向率分别为0.15 ℃·(10a)$^{-1}$和0.33 ℃·(10a)$^{-1}$，夏季分别为0.09 ℃·(10a)$^{-1}$和0.22 ℃·(10a)$^{-1}$，秋季分别为0.20 ℃·(10a)$^{-1}$和0.22 ℃·(10a)$^{-1}$，冬季分别为0.48 ℃·(10a)$^{-1}$和0.25 ℃·(10a)$^{-1}$。整体上，东部地区近60 a升温以春冬季最显著，与西部及整个西北地区一致，突变后则除了冬季外，其他季节均出现更显著的增温趋势，值得关注的是同西部一致，东部突变后春季升温最显著，但是总体升温率更高。依据年代际波动特征，可以推测近些年东部升温主要由春季贡献，其次为冬季，夏季和秋季贡献相同，对比西部突变后的特征发现冬春季升温较弱，升温率较西部小0.16 ℃·(10a)$^{-1}$。

图14为东部地区春夏秋冬降水距平的时间演变，气候倾向率分别为0.72 mm·(10a)$^{-1}$、3.65 mm·(10a)$^{-1}$、0.17 mm·(10a)$^{-1}$、0.70 mm·(10a)$^{-1}$，以夏季降水增加最为显著。11 a滑动平均结果可见，东部地区秋季降水未发生突变，春夏冬降水突变时间分别为2015年、1978年、1986年。因春季突变时间距今不足一个年代(10 a)，而秋季未发生突变，本文进一步计算夏季和冬季降水突变前后气候倾向率，夏季分别为3.47 mm·(10a)$^{-1}$和1.84 mm·(10a)$^{-1}$，冬季分别为0.27 mm·(10a)$^{-1}$和−0.45 mm·(10a)$^{-1}$。总体来看，长期趋势以夏季增加最显著，其次为增加速率基本相等的春冬季，秋季降水增加不明显，这一季节差异性与西部及整个西北地区一致。对比发现，各季节突变顺序与整个西北地区一致，并且年代际波动趋势与整个西北地区类似，说明西北东部地区对整个西北地区年代际变化的影响较西北西部更大。

4 讨 论

本文西北地区暖湿化于1997年左右开始东扩的这一结果与已有研究结果一致[22−23]，并且西北西部气温突变时间(1994年)与已有研究中1993年发生突变结果[35]仅相差1 a，与本文研究基本一致而西部降水突变时间(1987年)与前人研究结果存在5 a左右的差异[36]，东部降水突变时间(2010年)与已有

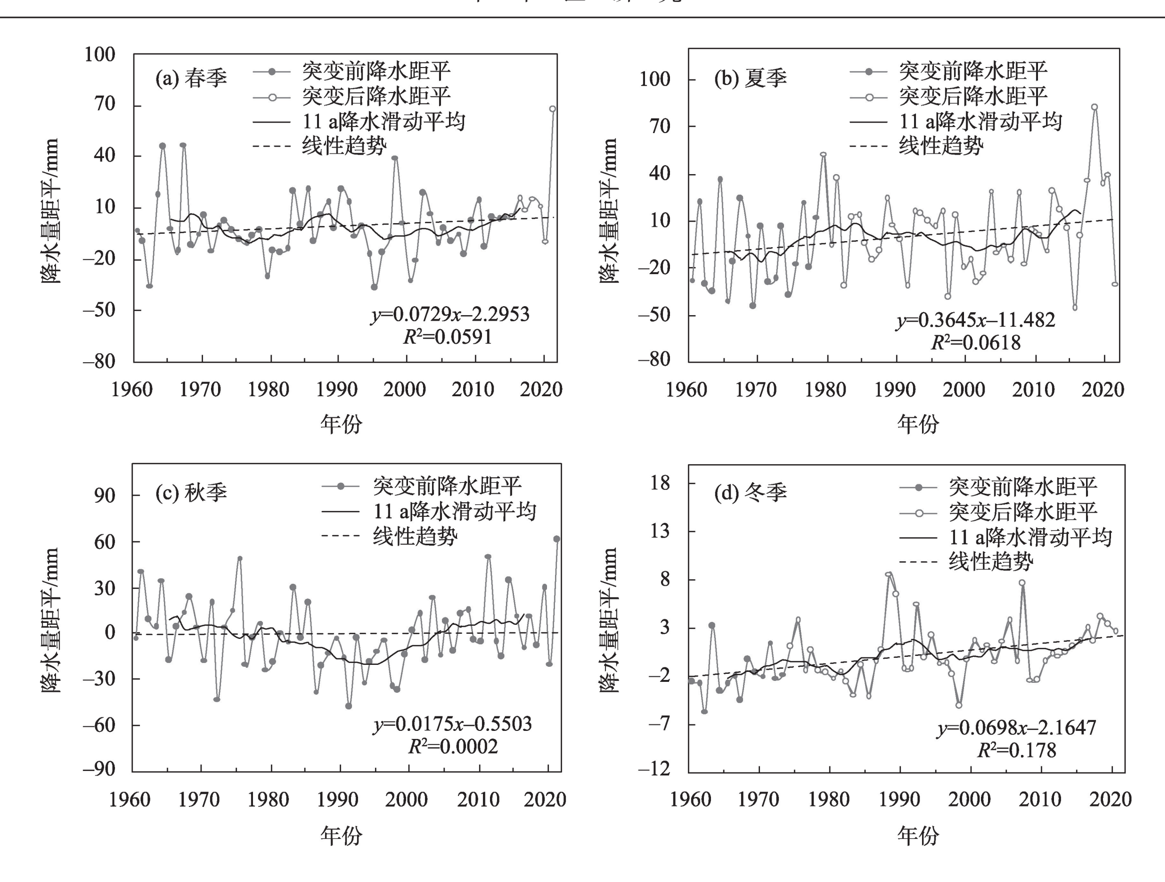


图14 1960—2021年西北东部地区春、夏、秋、冬降水量距平变化

Fig. 14 Variation of precipitation anomalies in all seasons in the east of Northwest China during 1960–2021

研究也存在差异[37-38]，出现上述差异与本文所使用的数据时间长短及站点数不同有关。结合上述时间演变特征和从气候突变前后气温及降水等值线空间分布发现，增温与降水增多后的气候空间格局并未发生十分显著的变化，进一步说明西北干旱半干旱的气候背景格局不会发生改变[26,29]，这主要是因为尽管西北地区降水增加，但绝对量并不大，同时增温所造成的蒸发需求增大，蒸发量增大使得西北气候背景并不能变得更湿润[29]。

气候暖湿化的原因十分复杂，目前IPCC报告研究指出人类活动排放的大量二氧化碳为气候变暖的主要原因，而导致西北气候变湿的原因更为复杂，有研究从水分循环[39]、年代际尺度的大气环流水汽输送异常[23,40]、季风环流与西风带相互作用[4,41-44]、海温[45]等角度解释降水增多的原因。本文仅研究了气温和降水两个要素在不同时间尺度的变化特征，而造成当前暖湿化东扩及春季快速升温背后的具体原因是什么，还需要从大气环流调整、变化等方面进一步探寻。此外，气候湿化的主要贡献季节从冬季调整为春季的现象背后的原因也需要进一步关注并研究。

5 结 论

本文利用1960—2021年西北地区127个气象台站的观测资料，选取气温和降水作为研究西北气候暖湿变化特征的两个重要因素，采用气候统计分析等方法，研究得到以下结论：

1960—2021年西北地区气候的长期暖湿化现象仍然持续，气温在全域的气候倾向率为0.32 ℃·$(10a)^{-1}$左右，降水距平气候倾向率为6.00~7.00 mm·$(10a)^{-1}$。年代际变化特征显示，整个西北地区气温在1993年左右发生突变，降水在1994年发生突变。年代际变化的空间分布上，西部暖湿化比东部更早，其中东部持续升温开始时间(20世纪80年代中期)比西部(70年代中期)晚10 a左右，突变基本一致(东部为1996年，西部为1994年)；东部降水持续增多时间(21世纪初)比西部降水持续增多时间(80年代初)晚20 a左右，突变时间(2017年)同样较西部(1987年)晚30 a左右。增温在西北全域具有空间一致性，暖湿化在西部早于东部，同时进入21世纪以来的近20 a，西北地区的暖湿化显著区域从

过去新疆扩展到了西北东部的甘肃、青海、宁夏、陕西地区。

值得注意的是,整个西北地区主要升温季节在气温突变前后发生了调整,突变前贡献最大的季节是冬季,突变后贡献最大的季节为春季0.47 ℃·$(10a)^{-1}$,且升温率更显著;西北地区变湿则主要是因为夏季降水增多所致,并且突变后夏季降水的增加趋势虽然减弱,但仍然是西北变湿的主要贡献季节,其次为冬季。西北西部在整个西北地区气候长期变湿过程中的贡献主要是春季、秋季,冬季和夏季贡献较小,而西北东部地区以夏季对增湿的贡献最显著,其次为增加速率基本相等的春冬季。近60 a暖湿化空间差异显示,西部地区暖湿化主要发生在新疆西北部;而东部地区暖湿化主要发生在青海地区。增暖现象主要在冬季的新疆西北部最为显著,其次在夏季的新疆东部地区最显著;增湿现象表现为春季、夏季的青海降水增加,冬季的新疆北部降水增加最显著,对西北变湿贡献最大。

参考文献(References):

[1] IPCC. Climate Change 2021: The Physical Science Basis[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2021: 8.

[2] 徐影, 张冰, 周波涛, 等. 基于CMIP5模式的中国地区未来高温灾害风险预估[J]. 气候变化研究进展, 2014, 10(4): 268−275. [Xu Ying, Zhang Bing, Zhou Botao, et al. Projected risk of extreme heat in China based on CMIP5 models[J]. Research Progress on Climate Change, 2014, 10(4): 268−275.]

[3] 张强, 朱飙, 杨金虎, 等. 西北地区气候暖湿化趋势的新特征[J]. 科学通报, 2022, 66(28−29): 3757−3771. [Zhang Qiang, Zhu Biao, Yang Jinhu, et al. New characteristics about the climate humidification trend in Northwest China[J]. China Science Bulletin, 2022, 66(28−29): 3757−3771.]

[4] Zhang Qiang, Yang Jinhu, Wang Wei, et al. Climatic warming and humidification in the arid region of Northwest China: Multi-scale characteristics and impacts on ecological vegetation[J]. Journal of Meteorological Research, 2021, 35(1): 113−127.

[5] Jones P D, Hulme M. Calculating regional climatic time series for series for temperature and precipitation: Methods and illustrations [J]. International Journal of Climatology, 1996, 169(4): 36−377.

[6] Hulme M, Osborn T J, Johns T C. Precipitation sensitivity to global warming: comparison of observations with HadCM2 simulations [J]. Geophysical Research Letters, 1998, 25(17): 3379−3382.

[7] Cook B, Smerdon J, SeagerR, et al. Global warming and 21st century drying[J]. Climate Dynamics, 2014, 43: 2607−2627.

[8] Sun Yang, Zhang Xueqin, Zheng Du. The impact of climate warming on agricultural climate resources in the arid region of Northwest China[J]. Journal of Natural Resources, 2010, 25(7): 1153−1162.

[9] Chen Yaning, Zhang Xueqi, Fang Gonghuan, et al. Potential risks and challenges of climate change in the arid region of Northwestern China[J]. Regional Sustainability, 2020, 1(1): 20−30.

[10] 中国气象局气候变化中心. 中国气候变化蓝皮书[M]. 北京: 科学出版社, 2019. [Climate Change Center, China Meteorological Administration. Blue Book on Climate Change in China[M]. Beijing: Science Press, 2019.]

[11] 施雅风, 沈永平, 胡汝骥, 等. 西北气候由暖干向暖湿转型的信号影响和前景初步探讨[J]. 冰川冻土, 2002, 24(3): 219−226. [Shi Yafeng, Shen Yongping, Hu Ruji, et al. Preliminary study on signal, impact and foreground of climatic shift from warm-dry to warm-humid in Northwest China[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2002, 24(3): 219−226.]

[12] 施雅风, 沈永平, 李栋梁, 等. 中国西北气候由暖干向暖湿转型的特征和趋势探讨[J]. 第四纪研究, 2003, 23(2): 152−164. [Shi Yafeng, Shen Yongping, Li Dongliang, et al. Discussion on the present climate from warm-dry to warm-wet in Northwest China[J]. Quaternary Sciences, 2003, 23(2): 152−164.]

[13] 王鹏祥, 杨金虎, 张强, 等. 近半个世纪来中国西北地面气候变化基本特征[J]. 地球科学进展, 2007, 22(6): 649−656. [Wang Pengxiang, Yang Jinhu, Zhang Qiang, et al. Climate change characteristic of Northwest China in recent half century[J]. Advances in Earth Science, 2007, 22(6): 649−656.]

[14] 王玉洁, 秦大河. 气候变化及人类活动对西北干旱区水资源影响研究综述[J]. 气候变化研究进展, 2017, 13(5): 483−493. [Wang Yujie, Qin Dahe. Influence of climate change and human activity on water resources in arid region of Northwest China: An overview[J]. Research Progress on Climate Change, 2017, 13(5): 483−493.]

[15] 李栋梁, 魏丽, 蔡英, 等. 中国西北现代气候变化事实与未来趋势展望[J]. 冰川冻土, 2003, 25(2): 135−142. [Li Dongliang, Wei Li, Cai Ying, et al. The present facts and the future tendency of the climate change in Northwest China[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2003, 25(2): 135−142.]

[16] 赵庆云, 张武, 王式功, 等. 西北地区东部干旱半干旱区极端降水事件的变化[J]. 中国沙漠, 2005, 25(6): 904−909. [Zhao Qingyun, Zhang Wu, Wang Shigong, et al. Changes in extreme precipitation events in the eastern arid and semi-arid regions of Northwest China[J]. Journal of Desert Research, 2005, 25(6): 904−909.]

[17] 王素萍, 张存杰, 李耀辉, 等. 基于标准化降水指数的1960−2011年中国不同时间尺度干旱特征[J]. 中国沙漠, 2014, 34(3): 827−834. [Wang Suping, Zhang Cunjie, Li Yaohui, et al. Analysis of multi-timescale drought variation based on standardized precipitation index in China during 1960−2011[J]. Journal of Desert Research, 2014, 34(3): 827−834.]

[18] 刘洪兰, 张强, 胡文超, 等. 1961—2011年西北地区春季降水变化特征及其空间分异性[J]. 冰川冻土, 2013, 35(4): 857−864. [Liu Honglan, Zhang Qiang, Hu Wenchao, et al. The changing characteristics of spring precipitation in Northwest China and their spatial differentiation during 1961−2011[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, 35(4): 857−864.]

[19] 卢宝宝, 孙慧兰, 姜泉泉, 等. 近53 a新疆水分盈亏量时空变化特征[J]. 干旱区研究, 2021, 38(6): 1579−1589. [Lu Baobao, Sun Huilan, Jiang Quanquan, et al. Spatial and temporal variability of water surplus and deficit in Xinjiang in the last 53 a[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(6): 1579−1589.]

[20] 商沙沙, 廉丽姝, 马婷, 等. 近54 a中国西北地区气温和降水的时空变化特征[J]. 干旱区研究, 2018, 35(1): 68−76. [Shang Shasha, Kang Lizhu, Ma Ting, et al. Spatiotemporal variation of temperature and precipitation in Northwest China in recent 54 years [J]. Arid Zone Research, 2018, 35(1): 68−76.]

[21] Zhang Qiang, Lin Jingjing, Liu Weicheng, et al. Precipitation seesaw phenomenon and its formation mechanism in the eastern and western parts of Northwest China during the flood season[J]. Science China Earth Sciences, 2019, 62(12): 2083−2098.

[22] 刘维成, 张强, 傅朝. 近55年来中国西北地区降水变化特征及影响因素分析[J]. 高原气象, 2017, 36(6): 1533−1545. [Liu Weicheng, Zhang Qiang, Fu Chao. Variation characteristics of precipitation and its affecting factors in Northwest China over the past 55 years[J]. Plateau Meteorology, 2017, 36(6): 1533−1545.]

[23] 张强, 朱飙, 杨金虎, 等. 西北地区气候湿化趋势的新特征[J]. 科学通报, 2021, 66(Z2): 3757−3771. [Zhang Qiang, Zhu Biao, Yang Jinhu, et al. New characteristics about the climate humidification trend in Northwest China[J]. Chinese Science Bulletin, 2021, 66 (Z2): 3757−3771.]

[24] 李明, 孙洪泉, 苏志诚, 等. 中国西北气候干湿变化研究进展[J]. 地理研究, 2021, 40(4): 1180−1194. [Li Ming, Sun Hongquan, Su Zhicheng, et al. Research progress in dry/wet climate variation in northwest China[J]. Geographical Research, 2021, 40(4): 1180−1194.]

[25] 杜懿, 王大刚, 祝金鑫. 基于CMIP5的中国西北地区暖湿化演变研究[J]. 水资源与水工程学报, 2021, 32(5): 61−69. [Du Yi, Wang Dagang, Zhu Jinxin. Study on warming and humidification evolution in Northwest China based on CMIP5[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2021, 32(5): 61−69.]

[26] 姚俊强, 李漠岩, 迪丽努尔·托列吾别克, 等. 不同时间尺度下新疆气候"暖湿化"特征[J]. 干旱区研究, 2022, 39(2): 333−346. [Yao Junqiang, Li Moyan, Dilinuer Tuoliewubieke, et al. The assessment on "warming-wetting" trend in Xinjiang at multi-scale during 1961−2019[J]. Arid Zone Research, 2021, 39(2): 333−346.]

[27] 张强, 张存杰, 白虎志, 等. 西北地区气候变化新动态及对干旱环境的影响:总体暖干化,局部出现暖湿迹象[J]. 干旱气象, 2010, 28(1): 1−7. [Zhang Qiang, Zhang Cunjie, Bai Huzhi, et al. New development of climate change in Northwest China and its impact on arid environment[J]. Arid Meteorology, 2010, 28(1): 1−7.]

[28] 王澄海, 张晟宁, 张飞民, 等. 论全球变暖背景下中国西北地区降水增加问题[J]. 地球科学进展, 2021, 36(9): 980−989. [Wang Chenghai, Zhang Shengning, Zhang Feimin, et al. On the increase of precipitation in the Northwestern China under the global warming[J]. Advances in Earth Science, 2021, 36(9): 980−989.]

[29] 王澄海, 张晟宁, 李课臣, 等. 1961—2018年西北地区降水的变化特征[J].大气科学, 2021, 45(4): 713−724. [Wang Chenghai, Zhang Shengning, Li Kechen, et al. Change characteristics of precipitation in Northwest China from 1961 to 2018[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2021, 45(4): 713−724.]

[30] 缪启龙. 中国近半个世纪最高气温变化特征[J]. 气象科学, 1998, 18(2): 103−112. [Miao Qilong. The maximum temperature change features for near half century in China[J]. Scientia Meteorological Scinica, 1998, 18(2): 103−112.]

[31] 张红丽, 张强, 刘晓云, 等. 华北河套地区气候干燥度的影响因素研究[J]. 气候变化研究进展, 2016, 12(1): 20−27. [Zhang Hongli, Zhang Qiang, Liu Xiaoyun, et al. Study on the main factors of aridity in Hetao Area of North China[J]. Climate Change Research Progress, 2016, 12(1): 20−27.]

[32] 魏凤英. 现代气候统计诊断预测技术[M]. 北京: 气象出版社, 2007: 63−11. [Wei Fengying. Modern Climate Statistics Diagnosis and Prediction Technology[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2007: 63−11.]

[33] 李伟, 李庆祥, 江志红. 用Kriging方法对中国历史气温数据插值可行性讨论[J]. 南京气象学院学报, 2007, 30(2): 246−252. [Li Wei, Li Qingxiang, Jiang Zhihong. Discussion on feasibility of gridding the historic temperature data in China with Kriging method[J]. Journal of Nanjing Institute of Meterology, 2007, 30(2): 246−252.]

[34] 张盛霖, 邓高燕, 黄勇奇. Mann-Kendall检验法在Excel中的实现与应用[J]. 中国科技论文在线, 2014(1): 1−7. [Zhang Shenglin, Deng Gaoyan, Huang Yongqi. Implementation and application of Mann-Kendall test method in excel[J]. http://www.paper.edu.cn, 2014(1): 1−7.]

[35] 康丽娟, 巴特尔·巴克, 罗那那, 等. 1961~2013年新疆气温和降水的时空变化特征分析[J]. 新疆农业科学, 2018, 55(1): 123−133. [Kang Lijuan, Bartel Bake, Luo Nana, et al. Analysis of spatial and temporal variation characteristics of temperature and precipitation in Xinjiang from 1961 to 2013[J]. Xinjiang Agricultural Science, 2018, 55(1): 123−133.]

[36] 贺晋云, 张明军, 王鹏, 等. 新疆气候变化研究进展[J]. 干旱区研究, 2011, 28(3): 499−508. [He Jinyun, Zhang Mingjun, Wang Peng, et al. Progress of climate change research in Xinjiang[J]. Arid Zone Research, 2011, 28(3): 499−508.]

[37] 王晖, 隆霄, 马旭林, 等. 近50 a中国西北地区东部降水特征[J]. 干旱区研究, 2013, 30(4): 712−718. [Wang Hui, Long Xiao, Ma Xulin, et al. Precipitation characteristics of eastern Northwest China in the last 50 a[J]. Arid Zone Research, 2013, 30(4): 712−718.]

[38] 崔洋, 谭志强. 1961—2009年西北地区东部降水时空分布及成因[J]. 干旱区研究, 2013, 30(6): 1094−1099. [Cui Yang, Tan Zhiqiang. Spatial and temporal distribution and causes of precipitation in eastern Northwest China from 1961 to 2009[J]. Arid Zone Research, 2013, 30(6): 1094−1099.]

[39] Yao Junqiang, Chen Yaning, Zhao Yong, et al. Climatic and associated atmospheric water cycle changes over the Xinjiang, China[J]. Journal of Hydrology, 2020, 585: 124823.

[40] 高洁, 赵勇, 姚俊强, 等.气候变化背景下中亚干旱区大气水分循环要素时空演变[J]. 干旱区研究, 2022, 39(5): 1371−1384.. [Gao Jie, Zhao Yong, Yao Junqiang, et al. Spatial and temporal evolution of atmospheric moisture cycle elements in the arid zone of Central Asia in the context of climate change[J]. Arid Zone Re-

search, 2022, 39(5): 1371–1384.]

[41] 杨金虎, 张强, 刘晓云, 等. 中国典型夏季风影响过渡区夏季降水异常时空特征及成因分析[J]. 地球物理学报, 2019, 62(11): 4120–4128. [Yang Jinghu, Zhang Qiang, Liu Xiaoyun. et al. Spatial-temporal characteristics and causes of summer precipitation anomalies in the transitional zone of typical summer monsoon, China[J]. Chinese Journal Geophysics, 2019, 62(11): 4120–4128.]

[42] 陈发虎, 陈婕, 黄伟. 东亚夏季风减弱诱发我国西北干旱区降水增加[J]. 中国科学: 地球科学, 2021, 51(5): 824–826. [Chen Fahu, Chen Jie, Huang Wei. The weakening of the East Asian summer monsoon induces an increase in precipitation in the arid regions of Northwest my country[J]. Science China: Earth Science, 2021, 51(5): 824–826.]

[43] Zhang Qiang, Yang Jinhu, Wang Wei, et al. Climatic warming and humidification in the arid region of Northwest China: Multi-scale characteristics and impacts on ecological vegetation[J]. Journal of Meteorology Research, 2021, 35(1): 113–127.

[44] Wang Shanshan, Huang Jianping, Huang Gang, et al. Enhanced impacts of indian ocean sea surface temperature on the dry/wet variations over Northwest China[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2022, 127(11): 1–16.

[45] 张太西, 樊静, 李元鹏, 等. 1961—2018年新疆区域高温变化与环流和海温关系[J]. 干旱区研究, 2021, 38(5): 1274–1284. [Zhang Taixi, Fan Jing, Li Yuanpeng, et al. Regional high temperature variability in relation to circulation and SST in Xinjiang from 1961–2018[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(5): 1274–1284.]

Analysis of spatial and seasonal variations in climate warming and humidification in Northwest China

ZHANG Hongli[1], HAN Fuqiang[2], ZHANG Liang[3], WANG Lixia[1], SUN Yuan[4], LI Fumin[1]

(1. College of Resource and Environmental Engineering, Tianshui Normal University, Tianshui 741000, Gansu, China; 2. College of Geographical Sciences and Tourism, Xinjiang Normal University, Urumqi 830054, Xinjiang, China; 3. Key Laboratory of Arid Climatic Change and Reducing Disaster of Gansu Province, Key Open Laboratory of Arid Climatic Change and Disaster Reduction, Institute of Arid Meteorology, China Meteorological Administration, Lanzhou 730020, Gansu, China; 4. National Climate Centre, Beijing 100081, China)

Abstract: Further exploration of trends in climate warming and humidification in Northwest China can deepen our understanding of important scientific issues regarding the responses to global warming of arid and semi-arid regions of the Northern Hemisphere in mid-and high latitudes. Using statistical methods such as linear trend, Kriging interpolation, and non-parametric Mann-Kendall test for temperature and precipitation data from 127 stations in Northwest China from 1961 to 2021, we show the following: (1) In the last 60 years, Northwest China as a whole has undergone significant warming and humidification. The regional warming trend was relatively consistent [0.32 ℃·$(10a)^{-1}$], while there was a clear regional imbalance of humidification, with the humidification in the west of Northwest China increasing earlier, more steadily, and more significantly than in the east. (Increases in the west were mainly distributed in Northwest Xinjiang, while those in the east were mainly in the Qinghai region). (2) There were pronounced interdecadal fluctuations of warming and humidification, and paradigm shifts in temperature and precipitation trends of Northwest China occurred in 1993 and 2010, respectively, after which the rates of warming and humidification were 0.08 ℃·$(10a)^{-1}$ and 37.60 mm·$(10a)^{-1}$ higher than beforehand. Warming and humidification were more prominent after these paradigm shifts, with the eastward expansion of warming and humidification being the main feature. (3) The seasonal imbalance of warming and humidification also showed that the warming was most significant in winter in western Northwest China, followed by that in summer; winter precipitation increased significantly in western Northwest China, while spring and summer precipitation increased significantly in eastern Northwest China. These results can provide a theoretical basis for formulating climate change countermeasures in Northwest China.

Keywords: Northwest China; warming and humidification; temperature; precipitation